



16个粗皮桉种源遗传特征分析及选优

王楚彪, 王建忠, 李华强, 何文亮, 谢耀坚, 卢万鸿, 林彦, 罗建中

引用本文:

王楚彪, 王建忠, 李华强, 等. 16个粗皮桉种源遗传特征分析及选优[J]. *热带亚热带植物学报*, 2022, 30(1): 54–62.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4394>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

滇南亚高山巨桉种源/家系变异及早期选择研究

Variation Analysis and Early Selection for *Eucalyptus grandis* Provenances/Families in Central South Yunnan Province
热带亚热带植物学报. 2017, 25(3): 257–263 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3692>

桉树及其杂交种叶片形态的遗传变异特征

Genetic Variation Patterns in Leaf Morphology on Eucalypts and Their Hybrids
热带亚热带植物学报. 2018, 26(6): 589–596 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3882>

7种桉树花粉微观形态及其亲缘关系分析

Analysis of Pollen Micro-morphology and Phylogenetic Relationship among Seven Species of *Eucalyptus*
热带亚热带植物学报. 2021, 29(2): 180–186 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4258>

不同种源/家系山鸡椒苗期生长性状遗传变异

Genetic Variation of Seedling Growth of *Litsea cubeba* from Different Provenances/families
热带亚热带植物学报. 2018, 26(1): 47–55 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3785>

5种相思树和尾巨桉人工林土壤养分和酶活性特征

Characteristics of Soil Nutrient and Enzyme Activities in Plantations of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* and Five *Acacia* Species
热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 483–493 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4334>

向下翻页, 浏览PDF全文

16 个粗皮桉种源遗传特征分析及选优

王楚彪^{1,2}, 王建忠³, 李华强⁴, 何文亮¹, 谢耀坚¹, 卢万鸿¹, 林彦¹, 罗建中^{1*}

(1. 国家林业和草原局桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022; 2. 南京林业大学, 南京 210037; 3. 广西国有东门林场, 广西 扶绥 532199; 4. 中林集团雷州林业局有限公司, 广东 湛江 524043)

摘要: 为选择优良种源及家系, 对广西东门林场不同种源 8 a 生粗皮桉(*Eucalyptus pellita*)生长和与纸浆材相关的材性性状的遗传特征进行研究。结果表明, 粗皮桉的木材平均纤维长度为 590.9 μm , 平均纤维宽度为 28.9 μm , 纤维长宽比为 20.34, 扭结指数为 0.29, 边材纤维的长宽比、扭结指数比心材的大。胸径与树高, 基本密度与纤维长宽比和扭结指数、边材纤维扭结指数与边材纤维长宽比均呈极显著正相关; 心材纤维扭结指数与心材纤维长宽比呈极显著负相关。根据主成分分析, 种源 4、13、10 为优良种源; 筛选出 25 个优良家系, 其中 146、084、53-11 排列前三。

关键词: 粗皮桉; 生长; 材性; 纤维质量; 遗传多样性

doi: 10.11926/jtsb.4394

Genetic Characteristics Analysis and Selection of 16 *Eucalyptus pellita* Provenances

WANG Chubiao^{1,2}, WANG Jianzhong³, LI Huaqiang⁴, HE Wenliang¹, XIE Yaojian¹, LU Wanhong¹, LIN Yan¹, LUO Jianzhong^{1*}

(1. China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang 524022, Guangdong, China; 2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Guangxi Dongmen State Forest Farm, Fusui 532199, Guangxi, China; 4. China Forestry Group Leizhou Forestry Bureau Co., Ltd., Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

Abstract: In order to select good provenance and family, the genetic characteristics in growth and wood properties associated with pulp wood of eight-year-old *Eucalyptus pellita* from different provenances in Guangxi Dongmen State Forest Farm were studied. The results showed that the average length and width of wood fiber was 590.9 and 28.9 μm , the fiber aspect ratio was 20.34 with kink index of 0.29, and the aspect ratio and kink index of sapwood fiber were larger than those of heartwood. There were very significant positive correlations between DBH and tree height, density with fiber length-width ratio and kink index, as well as kink index with length-width ratio of sapwood fiber, while kink index was very significant negative correlation with length-width ratio of heartwood fiber. So, according to principal component analysis (PCA), the provenances 4, 13, 10 were excellent, and 25 families were good, in which 146, 084 and 53-11 families were the top three.

Key words: *Eucalyptus pellita*; Growth; Wood property; Fiber quality; Genetic diversity

桉树(*Eucalyptus*)是世界著名的三大速生树种之一, 适应强、生材快, 木材密度大, 具有易煮、易漂、易打浆等特点, 不但产出高, 还有针叶木纸浆所欠缺的优良性能, 是造纸工业的好原料^[1]。粗

收稿日期: 2021-02-05

接受日期: 2021-04-19

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项(CAFYBB2021MB002); 广东省林业科技创新项目(2017KJCX031, 2019KJCX014); 广西创新驱动发展专项资金项目(桂科 AA17204087-3)资助

This work was supported by the Project for Basic Research in Chinese Academy of Forestry (Grant No. CAFYBB2021MB002); the Project for Forestry Scientific Technology Innovation in Guangdong (Grant No. 2017KJCX031, 2019KJCX014); and the Special Project for Innovation-Driven Development in Guangxi (Grant No. AA17204087-3).

作者简介: 王楚彪(1982~), 男, 助理研究员, 从事林木遗传育种研究。E-mail: scauwcb@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: 969170789@qq.com

皮桉(*E. pellita*)原产于澳大利亚昆士兰州沿海地带, 生长迅速、木质坚实且力学强度适中, 为理想实木利用树种, 目前广泛用于建筑枕木、造船、木地板等用材^[2], 同时可用于制浆。

在桉树遗传多样性和选育上已有不少研究, 如采用随机区组实验并基于混合线性无偏估计模型, 获得桉树遗传参数进而评估筛选优良家系或种源^[3-6]; 通过生长性状和纤维特性因子间的相互关系进行主成分分析, 筛选出邓恩桉(*E. dunnii*)优良种源^[7]; 基于生长性状和纤维特性指标并运用主成分分析, 筛选出优良无性系^[8]; 对 36 个尾巨桉(*E. urophylla* × *E. grandis*)子代的抗风值、生长性状、材质性状进行相关性分析, 并根据育种目标采用主成分分析筛选优良种源^[9]。而对纸浆材相关性状的研究不多, 而且与桉树纤维相关的性状中, 在国内很少涉及到纤维扭结指数的研究。

本文通过分析粗皮桉 16 个种源 205 个家系的生长和与纸浆材相关的材性性状的遗传变异特征以及各性状间的关系, 基于主成分分析筛选表现较为优良的种源和家系, 以期对粗皮桉的选育提供借鉴。

1 材料和方法

1.1 材料

试验位于广西扶绥县东门镇广西国有东门林场, 海拔约 130 m, 属亚热带湿润季风气候, 土壤为砖红壤性红壤, 年均气温 21.5 °C, 年均降水量 1 150 mm。选取粗皮桉(*Eucalyptus pellita*)的 16 个种源 205 个家系于 2011 年 7 月种植, 使用随机区组设计, 每家系单行 4 株小区, 共 6 个重复。粗皮桉来自澳大利亚昆士兰州(QLD)和巴布亚新几内亚(PNG), 种源地情况见表 1。

表 1 参试粗皮桉种源基本情况

Table 1 Basic situation of geographical provenance of *Eucalyptus pellita*

编号 No.	种源 Provenance	产地 Origin	经度 Longitude (S)	纬度 Latitude (E)
1	A17860	13 km SSW Kuranda QLD	16°56'	145°36'
2	S16120	6 km South Keru to Mata PNG	8°36'	141°45'
3	A18597	9.25 km S Cardwell QLD	18°25'	147°56'
4	S16122	Between Ggoe and Kiriwa PNG	8°20'	141°32'
5	A18598	Cardwell-Kennedy QLD	18°15'	145°55'
6	A18749	Daintree QLD	16°15'	145°21'
7	A18599	Julatten QLD	16°37'	145°28'
8	A20659	Meru WP PNG	8°27'	141°28'
9	A17848	Mossman QLD	17°05'	145°31'
10	S11947	Near Kuranda QLD	16°14'	145°33'
11	S16121	North Tokwa to Kiriwa PNG	8°30'	141°25'
12	A17861	NW Kuranda QLD	16°41'	145°32'
13	A18197	S of Kiriwa WP PNG	8°25'	141°30'
14	A18199	Serisa Village WP PNG	8°36'	141°26'
15	B10	SF 591 Abergowrie QLD	18°25'	145°57'
16	A18750	Wonga-Daintree QLD	16°16'	145°22'

1.2 方法

于 2019 年 3 月, 测量粗皮桉的胸径和树高, 并在立木胸径高度处采集木芯, 每处理至少 5 个重复。木材基本密度使用饱和和排水法测量^[10]。使用常规法解样木芯^[11], 将样品洗涤后放入专用打样筒打磨分散纤维, 用纤维质量分析仪测定纤维长、宽和扭结指数。

1.3 数据的统计分析

使用 EXCEL 软件对数据进行整理, 使用 SPSS

软件对数据标准化、计算相关系数、主成分分析, 使用 ORIGIN 进行聚类分析(组间平均欧式距离法)绘图。

变异系数 $CV_p = \sigma / \mu$, 材积($V, m^3/ind.$) = $1/3 \times \pi \times H \times (DBH/200)^2$, 基本密度($BD, g/cm^3$) = M/V , 纤维长宽比(slenderness ratio, SR) = FL/FW , 式中, σ 为性状标准差, μ 为性状均值, H 为树高(m), DBH 为胸径(cm), M 为烘干木段的质量(g), V 为木段体积(cm^3), FL 、 FW 分别为纤维长度(μm)和宽度(μm)。

纤维扭结指数 $= [2N_{(21\sim 45)} + 3N_{(46\sim 90)} + 4N_{(91\sim 180)}] / L_{\text{总}}^{[12]}$, 式中, $N_{(21\sim 45)}$ 、 $N_{(46\sim 90)}$ 和 $N_{(91\sim 180)}$ 为在 $21^\circ \sim 45^\circ$ 、 $46^\circ \sim 90^\circ$ 和 $91^\circ \sim 180^\circ$ 内突变点的数量(个), $L_{\text{总}}$ 为样品纤维的总长度(μm)。主成分综合得分 $Y = \sum m_i = (V_i Z_i) / V_T$, $i=1, 2, \dots, m$, 式中, V_i 是第 i 个主成分的方差贡献率, Z_i 是第 i 个主成分的影响因子标准化后的得分, V_T 是主成分的方差贡献率总和。

方差分析采用一般线性模型 $y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}$, 式中, y_{ij} 是表型观测值, μ 是总体平均值, α_i 是种源的固定效应, ε_{ij} 为误差。种源间的性状差异显著性检验采用 Duncan 多重比较法, 显著性水平 $\alpha=0.1$ 。

2 结果和分析

2.1 生长和材性表现

生长表现 从表 2 可见, 16 个 8 a 生粗皮桉种源的平均树高达到 19.97 m, 年均高生长量 2.49 m; 平均胸径为 17.77 cm, 年均胸径生长量 2.22 cm。种源 9 的树高变异系数(26.32%)比其他种源的高, 种源 11 的胸径变异系数(29.02%)最大。尽管种源 1 的树高变异系数最小, 但胸径的变异系数较高。从

树高与胸径的变异系数看, 种源 10 具有良好的遗传稳定性, 且树高与胸径也是最大, 具有较大的材积(0.2224 m^3)。多重比较结果表明, 各生长性状在种源间的差异不显著($P>0.05$)。当显著性水平 α 为 0.1 时, 某些种源间树高存在差异, 即种源 4、10、13 与种源 11 和 9, 以及种源 8 与种源 9 的差异显著, 其余种源间差异不显著。

纸浆材材性 木材密度、纤维长宽比与纸浆生产率直接相关^[13-14]。从表 3 可见, 16 个种源粗皮桉木芯的木材密度为 $0.499 \sim 0.540 \text{ g/cm}^3$, 平均为 0.518 g/cm^3 , 其中最大的是种源 15; 最小的是种源 6, 种源 8 的木材密度变异系数最大, 种源 13 的最小。16 个种源的边材纤维长度平均为 $683.0 \mu\text{m}$, 心材纤维长度平均为 $498.8 \mu\text{m}$, 平均为 $590.9 \mu\text{m}$; 边材纤维宽度平均为 $30.1 \mu\text{m}$, 心材纤维宽度平均为 $27.8 \mu\text{m}$, 平均为 $28.9 \mu\text{m}$ 。对各材性性状进行常规多重比较, 结果表明各材性性状中, 种源之间差异不显著($P>0.05$)。当显著性水平 $\alpha=0.1$ 时, 心材纤维扭结指数性状存在差异, 即种源 11 与种源 5 和 13 差异显著; 种源 11 与种源 8 和 9 也差异显著, 其余种源间差异不显著。各种源的边材纤维长宽比

表 2 粗皮桉种源的生长性状

Table 2 Growth traits of *Eucalyptus pellita* provenances

种源 Provenance	家系数 Number of family	H (m)		DBH (cm)		V ($\text{m}^3/\text{ind.}$)	
		平均 Mean	CV /%	平均 Mean	CV /%	平均 Mean	CV /%
1	6	19.82 ± 1.10abc	5.55	16.38 ± 2.86a	17.48	0.1447 ± 0.0566a	39.15
2	8	20.43 ± 3.21abc	15.73	17.73 ± 4.54a	25.60	0.1862 ± 0.0969a	52.01
3	6	20.27 ± 2.78abc	13.69	18.95 ± 2.13a	11.23	0.1952 ± 0.0647a	33.15
4	5	21.80 ± 1.66a	7.61	19.00 ± 1.81a	9.52	0.2091 ± 0.0551a	26.33
5	9	20.44 ± 2.35abc	11.48	17.02 ± 2.77a	16.26	0.1600 ± 0.0581a	36.28
6	15	20.01 ± 2.57abc	12.86	17.95 ± 3.05a	17.02	0.1752 ± 0.0703a	40.13
7	53	19.55 ± 3.45abc	17.63	17.71 ± 3.75a	21.15	0.1754 ± 0.0846a	48.22
8	7	21.50 ± 1.63ab	7.57	17.90 ± 2.66a	14.89	0.1825 ± 0.0506a	27.71
9	5	18.14 ± 4.77c	26.32	18.92 ± 4.96a	26.24	0.1947 ± 0.1015a	52.15
10	8	21.85 ± 1.28a	5.87	19.69 ± 1.76a	8.94	0.2224 ± 0.0361a	16.21
11	5	18.58 ± 4.29bc	23.11	16.68 ± 4.84a	29.02	0.1523 ± 0.0904a	59.36
12	25	20.27 ± 3.05abc	15.06	18.06 ± 3.62a	20.05	0.1856 ± 0.0812a	43.74
13	5	21.84 ± 1.54a	7.04	17.26 ± 1.40a	8.11	0.1722 ± 0.0365a	21.20
14	7	19.97 ± 2.34abc	11.70	17.87 ± 2.73a	15.29	0.1741 ± 0.0776a	44.57
15	5	20.78 ± 2.87abc	13.82	18.26 ± 3.40a	18.63	0.1927 ± 0.0906a	47.03
16	36	19.23 ± 3.12abc	16.21	17.14 ± 3.91a	22.78	0.1626 ± 0.0803a	49.37
总计 Total	205	19.97 ± 3.02	15.11	17.77 ± 3.46	19.47	0.1770 ± 0.0763	43.14

1~16 见表 1; H: 树高; DBH: 胸径; V: 材积; CV: 变异系数; 同列数据后不同字母表示差异显著(Duncan 法, $P<0.1$)。

1-16 see Table 1. H: Tree height; DBH: Diameter at breast height; V: Volume; CV: Variable coefficient. Data followed different letters within column indicate significant differences at 0.1 level (Duncan's test).

大于心材纤维, 说明粗皮桉木材由内到外纤维长宽比增加; 边材纤维长宽比的变异系数比心材纤维的小, 说明边材纤维具有较强的遗传稳定性。边材纤维长宽比平均为 22.73, 比心材纤维的大 4.78, 说明边材纤维具有较大的利用价值。边材纤维长宽比最大的为种源 5 (23.31), 最小的为种源 14 (22.13), 纤维长宽比在种源间的差异不显著。边材纤维长宽

比变异系数较大的为种源 8, 最小的为种源 11。木材纤维扭结指数与浆张强度相关^[15-16], 16 个种源边材纤维的扭结指数平均为 0.32, 心材纤维平均为 0.26, 边材纤维的扭结指数大于心材纤维, 说明粗皮桉木材由内到外纤维扭结指数增加; 而心材纤维的扭结指数变异系数较大, 以种源 4 的最大 (38.09%)。

表 3 粗皮桉种源的材性性状

Table 3 Wood properties of *Eucalyptus pellita* provenances

种源 Provenance	BD		L/W				KI			
	平均 Mean (g/cm ³)	CV /%	HF		SF		HF		SF	
			平均 Mean	CV /%	平均 Mean	CV /%	平均 Mean	CV /%	平均 Mean	CV /%
1	0.519 ±0.052a	10.01	18.26 ±2.07a	11.36	22.85 ±2.04a	8.92	0.25 ±0.05abc	21.23	0.33 ±0.06a	17.38
2	0.502 ±0.040a	7.89	17.41 ±1.36a	7.82	22.49 ±1.63a	7.25	0.25 ±0.07abc	29.69	0.32 ±0.03a	10.92
3	0.528 ±0.052a	9.85	18.93 ±1.36a	7.21	23.29 ±1.45a	6.21	0.26 ±0.07abc	27.16	0.30 ±0.04a	14.64
4	0.518 ±0.030a	5.82	18.16 ±1.75a	9.64	22.39 ±1.07a	4.76	0.24 ±0.09abc	38.09	0.32 ±0.05a	17.26
5	0.534 ±0.027a	5.11	17.99 ±1.05a	5.83	23.31 ±1.28a	5.47	0.23 ±0.06bc	24.47	0.32 ±0.04a	12.37
6	0.499 ±0.035a	7.09	17.25 ±1.60a	9.27	22.51 ±1.21a	5.38	0.26 ±0.08abc	31.81	0.34 ±0.04a	11.64
7	0.519 ±0.046a	8.91	18.39 ±2.00a	10.85	22.76 ±1.49a	6.55	0.26 ±0.06abc	23.91	0.31 ±0.06a	18.66
8	0.518 ±0.059a	11.42	17.71 ±0.41a	2.31	23.30 ±2.25a	9.66	0.28 ±0.04ab	15.57	0.34 ±0.06a	18.65
9	0.533 ±0.044a	8.27	18.06 ±1.35a	7.49	22.97 ±1.64a	7.16	0.29 ±0.05ab	15.72	0.34 ±0.06a	18.41
10	0.529 ±0.046a	8.71	17.72 ±1.63a	9.18	22.93 ±1.92a	8.37	0.26 ±0.05abc	17.55	0.31 ±0.04a	11.98
11	0.518 ±0.041a	7.90	17.96 ±1.50a	8.33	23.02 ±0.56a	2.41	0.31 ±0.07a	21.75	0.31 ±0.03a	8.93
12	0.521 ±0.045a	8.54	18.04 ±1.84a	10.17	22.56 ±1.38a	6.12	0.26 ±0.08abc	30.33	0.33 ±0.05a	14.61
13	0.508 ±0.023a	4.48	17.44 ±1.97a	11.27	23.10 ±1.22a	5.30	0.20 ±0.05c	23.60	0.31 ±0.05a	15.01
14	0.522 ±0.034a	6.46	17.82 ±0.79a	4.44	22.13 ±1.58a	7.14	0.24 ±0.03abc	12.51	0.33 ±0.09a	27.23
15	0.540 ±0.028a	5.22	18.74 ±0.72a	3.83	22.43 ±1.25a	5.58	0.24 ±0.06abc	23.88	0.34 ±0.06a	16.41
16	0.514 ±0.056a	10.81	17.44 ±1.97a	11.30	22.59 ±1.45a	6.42	0.26 ±0.07abc	25.65	0.30 ±0.06a	19.11
总计 Total	0.518 ±0.045	8.66	17.95 ±1.75	9.74	22.73 ±1.46	6.42	0.26 ±0.07	25.43	0.32 ±0.05	16.79

BD: 木材密度; L/W: 长宽比; HF: 心材纤维; SF: 边材纤维; KI: 扭结指数; CV: 变异系数; 同列数据后不同字母表示差异显著(Duncan 法, $P < 0.1$)。

BD: Density; L/W: Length-width ratio; HF: Heartwood fiber; SF: Sapwood fiber; KI: Kink index; CV: Variable coefficient. Data followed different letters within column indicate significant differences at 0.1 level (Duncan's test).

2.2 遗传距离

基于生长和木材材性性状, 对 16 个种源进行聚类分析(图 1), 16 个种源可归为 3 类(分类依据是种源来自 QLD、PNG 地区), 其中种源 13、5 聚为一类(均不属于 QLD 和 PNG 地区), 说明与其他种源有较大的遗传距离。剩下的 14 个种源分为 2 类, 其中一类大多来自 QLD 地区(包括种源 15、12、7、10、9、6、8、3 和 1), 另一类大多来自 PNG 地区(包括种源 14、16、4、11 和 2)。

2.3 相关性分析

从表 4 可见, 粗皮桉 16 个种源的树高与胸径、

材积、边材纤维的长宽比和扭结指数呈极显著正相关。胸径与材积、边材纤维长宽比和扭结指数呈极显著正相关, 而与密度呈显著正相关。材积与边材纤维的长宽比和扭结指数呈极显著正相关, 而与密度呈显著正相关。可见, 树高、胸径和材积的均显著影响边材纤维性状。粗皮桉 16 个种源的密度与纤维长宽比、扭结指数呈极显著正相关, 说明密度不仅影响边材纤维长宽比和扭结指数, 对心材纤维也有影响。心材纤维长宽比与边材纤维长宽比、心材纤维扭结指数呈显著正相关, 与边材纤维扭结指数呈负相关; 边材纤维长宽比与边材纤维扭结指数呈显著正相关; 心材纤维扭结指数与边材纤维扭结

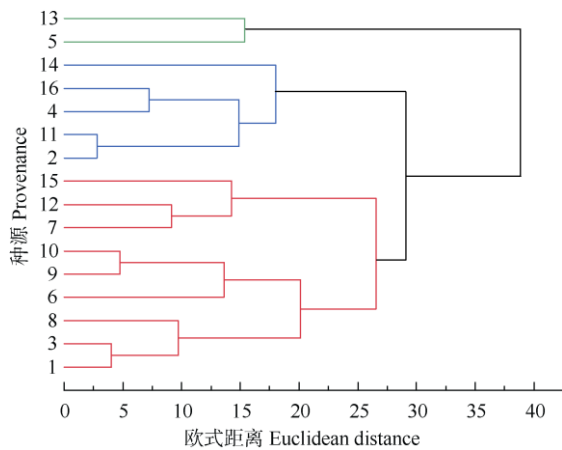


图 1 粗皮桉 16 个种源的聚类分析。1~16 见表 1。

Fig. 1 Cluster lineages of *Eucalyptus pellita* provenances in the trial. 1-16 see Table 1.

表 4 粗皮桉种源性状间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients among traits of *Eucalyptus pellita* provenances

	H	DBH	V	BD	L/W of SF	KI of HF	KI of SF	
H	1							
DBH	0.667**	1						
V	0.753**	0.961**	1					
BD	0.07	0.14*	0.126*	1				
L/W of HF	0.079	0.094	0.106	0.195**	1			
L/W of SF	0.352**	0.236**	0.265**	0.292**	0.257**	1		
KI of HF	-0.048	0.023	0.026	0.281**	-0.306**	-0.005	1	
KI of SF	0.265**	0.259**	0.246**	0.197**	-0.031	0.26**	0.217**	1

** : $P < 0.01$; * : $P < 0.05$; H: 树高; DBH: 胸径; V: 材积; BD: 木材密度; L/W: 长宽比; HF: 心材纤维; SF: 边材纤维; KI: 扭结指数。

** : $P < 0.01$; * : $P < 0.05$; BD: Density; L/W: Length-width ratio; HF: Heartwood fiber; SF: Sapwood fiber; KI: Kink index.

主要因子与树高、胸径、材积密切相关；第二主要因子能代表密度、心材与边材长宽比；第三主要因子为心材与边材的纤维扭结指数。根据主成分分析获得 3 个主要因子的得分值(PC1、PC2 和 PC3)(表 5)。根据 3 个主成分因子的贡献率，计算综合得分(权重比 PC1 : PC2 : PC3=0.345 : 0.194 : -0.185)，因为纤维扭结指数越大，纤维材性越差^[15]，所以为负值。对 16 个种源进行评分排序(表 5)，结果表明种源 4、13 和 10 排列前三，衡量树高、胸径和材积的因子 1 在 PC1 得分最高的是种源 10，与生长状况分析一致；衡量密度、纤维长宽比的因子 2 在 PC2 得分最高的是种源 3；衡量纤维扭结指数的因子 3 在 PC3 得分最小的是种源 13。

因子得分排序中，种源 4 排列第一，其优良家系为 53-30 (家系得分为 0.75)，其纤维扭结指数得分较其他种源低，说明该种源用于浆材较好，但其

指数呈显著正相关。

材积与树高的相关系数为 0.753；与胸径为 0.961，因材积是树高与胸径乘积，所以材积与树高和胸径的相关系数较高。其次树高与胸径的相关系数为 0.667。

2.4 优良种源和家系的选择

利用因子分析对粗皮桉的 8 个指标进行主成分分析，旋转方法为凯撒正态化最大方差法，获得 3 个因子的特征根大于 1，对应的方差贡献率分别为 34.51%、19.35% 和 18.47%，累积贡献率达 72.32%，说明主要特征信息已经提取，能集中反映出物种的特征和趋势。

对因子载荷矩阵实行方差最大正交旋转，第一

密度和纤维长宽比得分较低，其纸浆生产率受到影响。排在第二的是种源 13，纤维扭结指数得分最低，但衡量树高与胸径的因子得分较低，导致材积低、原料不足。排在第三的是种源 10，衡量树高、胸径和材积的因子得分最高，可大大提高原料数量。

3 结论和讨论

3.1 生长性状

粗皮桉的树高、胸径、材积在种源间差异不显著($P > 0.05$)。种源 10 的树高、材积变异系数比其他种源小，说明其具有较强的遗传稳定性，且其树高、胸径、材积比其他种源高。

205 个家系的得分排序中(表 6)，以 12% 的入选率筛选出 25 个优良家系，其中排列前三的家系分别为 146 (种源 12)、084 (种源 7) 和 53-11 (种源 2)，

表 5 粗皮桉种源的主成分分析得分排序

Table 5 Factor score and rank by PCA of *Eucalyptus pellita* provenances

种源 Provenance	PC1	PC2	PC3	得分 Score	排序 Rank
4	0.5176	-0.1153	-0.2104	0.1940	1
13	0.3161	-0.1470	-0.5798	0.1880	2
10	0.6084	-0.0087	0.1282	0.1838	3
3	0.1542	0.4800	-0.1759	0.1767	4
15	0.1703	0.3931	-0.0666	0.1480	5
5	-0.0711	0.3943	-0.1407	0.0767	6
8	0.2888	0.1005	0.3974	0.0457	7
12	0.0938	0.0156	0.1070	0.0160	8
7	-0.1021	0.1397	-0.1200	0.0147	9
14	0.0232	-0.1460	-0.0697	-0.0086	10
2	0.1512	-0.4058	-0.0519	-0.0175	11
1	-0.2677	0.2196	-0.0909	-0.0333	12
6	0.1223	-0.4362	0.1654	-0.0740	13
9	-0.1429	0.3017	0.4903	-0.0820	14
16	-0.2149	-0.2253	0.0220	-0.1219	15
11	-0.4563	0.1170	0.4415	-0.2180	16

表 6 粗皮桉 25 个优良家系的主成分分析得分排序

Table 6 Factor score and rank by PCA of *Eucalyptus pellita* families

家系 Family	PC1	PC2	PC3	得分排名 Score	排名 Rank
146	1.1689	1.2681	-2.0155	1.0222	1
084	0.9051	1.7596	-1.3223	0.8982	2
53-11	1.5341	0.3088	-1.6035	0.8858	3
099	1.0741	1.0520	-1.3193	0.8187	4
53-30	0.5646	0.4763	-2.5013	0.7499	5
138-20	1.2082	0.6878	-1.0143	0.7379	6
138-50	1.2309	0.7466	-0.9167	0.7391	7
136	0.9460	0.6918	-1.2660	0.6948	8
013	0.8755	0.9431	-1.0613	0.6813	9
042	2.3532	-0.5273	0.5540	0.6071	10
219	1.4312	0.0838	-0.5254	0.6072	11
97	1.1009	2.0805	1.0053	0.5974	12
041	0.8600	0.3728	-1.2536	0.6009	13
159	0.3861	1.9288	-0.4149	0.5842	14
024	1.7057	-0.6259	-0.5746	0.5734	15
53-28	1.0020	0.5703	-0.5557	0.5591	16
220	0.8570	-0.3926	-1.8540	0.5625	17
196	1.5429	-0.2318	-0.3380	0.5499	18
151	0.8015	1.2693	-0.1151	0.5441	19
138-49	-0.1091	1.3578	-1.5849	0.5190	20
154	-0.0570	2.5362	-0.2522	0.5190	21
162	0.9837	0.4191	-0.4957	0.5124	22
143	1.3653	-0.0425	-0.1225	0.4855	23
119	0.5601	1.8600	0.3850	0.4828	24
018	0.7767	0.5042	-0.5984	0.4765	25

得分分别为 1.02、0.90 和 0.89。

粗皮桉的胸径与树高呈极显著正相关，这与前

人^[6,8,17]的研究结果一致。树高、胸径与边材纤维的长宽比和扭结指数呈极显著正相关，说明生长性状

与边材纤维存在一定的相关性。尚秀华等^[5]报道 4 a 生赤桉(*E. camaldulensis*)的生长性状与纤维宽度呈显著负相关;与纤维长宽比呈显著正相关。卢晨升^[6]报道 9 a 生邓恩桉的生长性状与纤维性状间不相关,这与本研究结果不一致,可能与桉树树种或者林龄差异有关^[18],也可能与立地条件差异有关。

3.2 木材材性

本研究结果表明,粗皮桉的木材密度为 0.401~0.623 g/cm³,平均为 0.518 g/cm³,变异系数为 8.66%,符合造纸工业对原料密度的要求^[19]。9 a 生邓恩桉的木材密度为 0.429~0.537 g/cm³,平均为 0.484 g/cm³,变异系数为 7.41%^[6];20 a 生邓恩桉木材密度为 0.547~0.651 g/cm³,平均为 0.605 g/cm³,变异系数为 6.00%^[7];7 a 生尾巨桉的木材密度为 0.443~0.481 g/cm³,平均 0.458 g/cm³^[20];44 个 5 a 生尾细桉(*E. urophylla* × *E. tereticornis*)无性系的木材密度为 0.455~0.510 g/cm³,平均为 0.482 g/cm³^[14],说明不同桉树的木材密度受到树龄、品种的影响,且随着树龄增长呈增加趋势^[21-23]。粗皮桉的木材密度变异范围、变异系数较大,说明其木材密度具有较大的选择潜力。34 a 生马尾松(*Pinus massoniana*)的木材密度为 0.461 g/cm³,且幼龄材高于过龄材和成熟材,且随着树龄的增长而降低^[24]。因此,树种不同,木材密度随树龄的变化趋势不同。在选择制浆材料时需考虑材料的树龄。

木材密度与纤维长宽比、纤维扭结指数呈极显著正相关,这与覃林波^[8]、卢晨升^[6]的研究结果一致。马尾松的木材密度与纤维长度、纤维长宽比呈显著负相关^[24]。说明不同树种的木材密度与纤维的生长有一定的相关性,但树种不同,相关性的差异较大,甚至相反。

粗皮桉的边材纤维长度和长宽比均大于心材,说明随心材与树皮的距离增加,边材纤维长度和长宽比有增加的趋势,这与前人^[6-7,20,25-27]的研究结果一致。纤维长度受树龄的影响,粗皮桉 DH32-29 的纤维长度随年龄而增长^[18],但达一定树龄时开始下降或趋于平稳^[28-29]。本研究中,8 a 生粗皮桉的木材纤维长度和长宽比分别为 590.9 μm 和 20.34,而 13 a 生粗皮桉的分别为 1 382.1 μm 和 97.38^[28],28 a 生粗皮桉的分别为 989 μm 和 63.40^[29]。本研究中粗皮桉的纤维长宽比小于 45,属于短纤维材料^[22],所以根据不同加工目的要求的纤维长宽

比,需要选择合适的树龄。

可见,边材纤维的制浆价值较大,选择优良品种时可根据边材纤维长宽比进行选择,可根据变异系数选择,种源 8 的边材纤维长宽比和变异系数较高,说明具有良好的选择潜力。主成分分析中,衡量密度、纤维长宽比的因子 2 得分最高的是种源 3,这与田睿等^[1]的研究结果一致。

粗皮桉的心材纤维扭结指数与边材纤维扭结指数呈极显著正相关,心材纤维扭结指数与心材纤维长宽比呈极显著负相关,边材纤维扭结指数与边材纤维长宽比呈极显著正相关,这与 Wu 等^[30]对尾叶桉的研究结果一致。

除树龄影响外,纤维长宽可能受到打磨程度影响,随着 PFI Mill(又称 PFI 打浆机,由打浆辊、带盖的打浆室和施加打浆压力的加压装置组成)打磨转速增加,纤维长度略有降低^[16]。随 PFI 打浆,纤维扭结指数减小^[15],磨断的纤维增多,所以打磨情况也会影响纤维长度,但本试验使用一致的打磨力度,其结果具有可比性。

3.3 选优

本研究的 8 a 生粗皮桉的木材密度为 0.518 g/cm³,纤维长度与宽度分别为 590.9 和 28.9 μm,长宽比为 20.34;扭结指数为 0.29,表明该树种在纤维形态方面适合制浆。经主成分分析筛选出 3 个优良种源,分别是种源 4、13 和 10,以及 25 个优良家系,其中 146、084、53-11 排列前三,为粗皮桉或其他桉树的材性研究提供了参考。但如要对材性性状和纸浆性能进行全面分析,还需对木材力学性能和化学组成成分进行探讨。

参考文献

- [1] TIAN R, YAO C L, ZHAO X, et al. Study on the fiber morphology of *Eucalyptus pellita* [J]. *Pap Sci Technol*, 2009, 28(2): 1-5. doi: 10.3969/j.issn.1671-4571.2009.02.001.
田睿,姚春丽,赵星,等.不同种源粗皮桉纤维形态的比较[J].造纸科学与技术,2009,28(2): 1-5. doi: 10.3969/j.issn.1671-4571.2009.02.001.
- [2] HARWOOD C E, ALLOYSIUS D, POMROY P, et al. Early growth and survival of *Eucalyptus pellita* provenances in a range of tropical environments, compared with *E. grandis*, *E. urophylla* and *Acacia mangium* [J]. *New For*, 1997, 14(3): 203-219. doi: 10.1023/A:1006524405455.

- [3] CAPPA E P, DE LIMA B M, DA SILVA-JUNIOR O B, et al. Improving genomic prediction of growth and wood traits in *Eucalyptus* using phenotypes from non-genotyped trees by single-step GBLUP [J]. *Plant Sci*, 2019, 284: 9–15. doi: 10.1016/j.plantsci.2019.03.017.
- [4] ALVES R S, DE CARVALHO ROCHA J R d A S, TEODORO P E, et al. Multiple-trait BLUP: A suitable strategy for genetic selection of *Eucalyptus* [J]. *Tree Genet Genom*, 2018, 14(5): 77–78. doi: 10.1007/s11295-018-1292-7.
- [5] SHANG X H, ZHANG P J, XIE Y J, et al. Wind resistance correlated to growth and wood properties of 50 *Eucalyptus camaldulensis* provenance families [J]. *J Zhejiang Agric For Univ*, 2017, 34(6): 1029–1037. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.2017.06.009.
尚秀华, 张沛健, 谢耀坚, 等. 50 个赤桉家系抗风性与生长、材性性状的相关性[J]. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(6): 1029–1037. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.2017.06.009.
- [6] LU C S. Analysis of genetic variation in *Eucalyptus dunnii* from different provenances and the selection of provenance [D]. Nanning: Guangxi University, 2018: 37–58.
卢晨升. 不同种源邓恩桉遗传变异分析及选择 [D]. 南宁: 广西大学, 2018: 37–58.
- [7] GUO D Q. The wood fiber characteristics of *Eucalyptus dunnii* provenances [D]. Nanning: Guangxi University, 2012: 18–45.
郭东强. 邓恩桉种源木材纤维特性变异研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2012: 18–45.
- [8] QIN L B. The study of growth traits and wood fiber characteristics variation of ten years old hybrid *Eucalyptus* clones forests [D]. Nanning: Guangxi University, 2018: 10–28.
覃林波. 10 年生杂交桉无性系生长性状与木材纤维特征变异研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2018: 10–28.
- [9] SHEN L, XU J M, LI G Y, et al. Correlation analysis and selection on wind resistance and correlative characters of *Eucalyptus urophylla* × *E grandis* F₁ hybrids [J]. *For Res*, 2020, 33(5): 13–20. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.05.002.
沈乐, 徐建民, 李光友, 等. 尾巨桉杂种 F₁ 与抗风性关联的性状分析及其选优 [J]. *林业科学研究*, 2020, 33(5): 13–20. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.05.002.
- [10] CHENG J Q. *Xylogology* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1985: 463–482.
成俊卿. *木材学* [M]. 北京: 中国林业出版社, 1985: 463–482.
- [11] LU W H. Study on variation of wood properties of poplar clones in *Populus deltoides* Marsh [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008: 23–24.
卢万鸿. 美洲黑杨无性系材性性状变异研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2008: 23–24.
- [12] KIBBLEWHITE R P. Effects of fiber kinking and pulp bleaching on wet web strength [J]. *Tappi J*, 1974, 57(8): 120–121.
- [13] NICKOLAS H, WILLIAMS D, DOWNES G, et al. Genetic correlations among pulpwood and solid-wood selection traits in *Eucalyptus globulus* [J]. *New For*, 2020, 51(1): 137–158. doi: 10.1007/s11056-019-09721-0.
- [14] PENG S Y. Selection on high-yielding hybrid clones of *Eucalyptus urophylla* × *E. tereticornis* for pulpwood plantation [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013: 65–72.
彭仕尧. 纸浆林尾细桉杂种无性系选育研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013: 65–72.
- [15] HONG C Z, LIU G N. Effect of fiber curl and kink on strength properties of handsheet [J]. *Trans China Pulp Pap*, 1997, 12(S1): 70–75.
洪传真, 刘桂南. 纤维卷曲指数和 KinK 指数对浆张强度的影响 [J]. *中国造纸学报*, 1997, 12(S1): 70–75.
- [16] YANG S J. Study on mathematical model regarding the relationship between wood pulp fiber properties and paper tensile strength [D]. Hangzhou: Zhejiang Science-Technology University, 2015: 18–27.
杨淑杰. 木浆纤维特性与纸页抗张强度关系的数学模型研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015: 18–27.
- [17] ZHANG J, CHEN G C, XU J M, et al. Comprehensive selection for *Eucalyptus grandis* provenances and families [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2016, 24(3): 280–286. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.03.006.
张捷, 陈广超, 徐建民, 等. 巨桉种源/家系综合选择研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2016, 24(3): 280–286. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.03.006.
- [18] WU S J, XU J M, LI G Y, et al. Age trends and correlations of fiber traits in clone of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* in Guangdong Province [J]. *Front Environ Sci*, 2017, 6(1): 10–14.
- [19] XUE C Y, HE W M, NIE Y, et al. Study on properties and pulping properties of *Eucalyptus* pulp [C]// Proceedings of the 14th Annual Conference of China Paper Society. Wuxi: China Paper Society, 2010: 48–53.
薛崇响, 贺文明, 聂怡, 等. 桉树纸浆材材性及制浆性能的研究 [C]// 中国造纸学会第十四届学术年会论文集. 无锡: 中国造纸学会, 2010: 48–53.
- [20] QIN Y L. Study on of main wood properties and their variations pattern of *E. urophylla* × *E. grandis* [D]. Nanning: Guangxi University, 2011: 21–37.
覃引鸾. 尾巨桉木材主要材性及其变异规律研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2011: 21–37.
- [21] ZHANG P J, SHANG X H, WU Z H. Difference in wood physical and

- mechanical properties of five kinds of *Eucalyptus* [J]. J NW For Univ, 2020, 35(4): 184–190. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2020.04.29.
- 张沛健, 尚秀华, 吴志华. 5 种桉树木材物理力学性质的差异比较 [J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 184–190. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2020.04.29.
- [22] LIANG F M, FANG G G, DENG Y J, et al. Pulpwood properties of improved hybrid *Eucalyptus urophylla* × *E. tereticornis* with different tree-age and analysis of APMP pulping properties [J]. Pap Sci Technol, 2013, 32(5): 1–6. doi: 10.19696/j.issn1671-4571.2013.05.001.
- 梁芳敏, 房桂干, 邓拥军, 等. 改良杂交尾细桉材性特征随树龄变化及 APMP 制浆性能分析 [J]. 造纸科学与技术, 2013, 32(5): 1–6. doi: 10.19696/j.issn1671-4571.2013.05.001.
- [23] SSEREMBA O E, MUGABI P, BANANA A Y, et al. Variation of basic density, calorific value and volumetric shrinkage within tree height and tree age of Ugandan grown *Eucalyptus grandis* wood [J]. J For Res, 2021, 32(2): 503–512. doi: 10.1007/s11676-020-01141-7.
- [24] YIN H H, LIU Q H, ZHOU Z C, et al. Genetic variation of wood basic density and fiber morphology and selection of *Pinus massoniana* [J]. J Zhejiang Agric For Univ, 2020, 37(6): 1186–1192. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.20190720.
- 尹焕焕, 刘青华, 周志春, 等. 马尾松无性系木材基本密度和纤维形态的变异及选择 [J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(6): 1186–1192. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.20190720.
- [25] LAN J, QIN L B, LI W, et al. Studies on the variation of wood fiber characteristics in 10-year-old *Eucalyptus* hybrid clones in Guangxi [J]. Eucalypt Sci Technol, 2019, 36(2): 16–20. doi: 10.13987/j.cnki.askj.2019.02.003.
- 兰俊, 覃林波, 黎巍, 等. 广西 10 年生杂交桉无性系木材纤维特征及变异研究 [J]. 桉树科技, 2019, 36(2): 16–20. doi: 10.13987/j.cnki.askj.2019.02.003.
- [26] PRASETYO A, AISO-SANADA H, ISHIGURI F, et al. Variations in anatomical characteristics and predicted paper quality of three *Eucalyptus* species planted in Indonesia [J]. Wood Sci Technol, 2019, 53(3): 1409–1423. doi: 10.1007/s00226-019-01137-5.
- [27] DE LIMA MELO L E, GOULART S L, GUIMARÃES B M R, et al. Prediction of microfibril angle for *Eucalyptus microcorys* wood by fiber length and basic density [J]. Maderas: Cienc tecnol, 2018, 20(4): 553–562. doi: 10.4067/S0718-221X2018005004301.
- [28] XIE L K. Wood properties of *Eucalyptus pellita* and variation regularities [D]. Changsha: Central South Forestry University, 2005: 15–17.
- 解林坤. 粗皮桉木材材性及其变异特性 [D]. 长沙: 中南林学院, 2005: 15–17.
- [29] CHEN G D, ZHENG J Q, MENG F H, et al. Study on the characteristics and variation of wood fiber in six *Eucalyptus* plantations [J]. J CS Univ For Technol, 2020, 40(10): 137–142, 168. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.10.016.
- 陈桂丹, 郑佳琪, 蒙芳慧, 等. 6 种桉树人工林木材纤维特性及变异规律 [J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(10): 137–142, 168. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.10.016.
- [30] WU S J, XU J M, LU Z H, et al. Genetic parameters in fibre traits from a full diallel of *Eucalyptus urophylla* in southern China [J]. J Trop For Sci, 2019, 31(3): 343–352. doi: 10.26525/jtfs2019.31.3.343.